

叠前 AVO 反演技术在川东北元坝地区中的应用

杨鸿飞,胡伟光,林琳,李文成

(中国石油化工股份有限公司勘探南方分公司研究院,成都 610041)

摘要:川东北元坝地区二叠系长兴组礁滩储层的油气、水系统相对复杂,钻遇水层或气水同层的情况时有发生,所以探索出一种有效的储层识别技术具有非常重要的意义。通过对井中储层段的流体类型进行物性分析研究,得出了该区含气层、气水同层、水层及非储层的地球物理响应特征;含气层、气水同层都具有泊松比值、 $\lambda\rho$ (拉梅系数 λ 与密度 ρ 的乘积)值较非储层值低的特点。利用 AVO 反演技术对该区礁滩储层进行反演,得到相应的泊松比、 $\lambda\rho$ 数据体。利用反演所得到的泊松比、 $\lambda\rho$ 成果预测了元坝地区长兴组礁滩储层的含气有利分布范围,预测结果和该区测井资料吻合度较高。结论表明,采用 AVO 反演技术进行海相礁滩储层识别具有重大现实意义。

关键词:礁滩储层;AVO 反演;储层识别;长兴组;川东北

中图分类号:P631.443

文献标识码:A

元坝气田^[1]位于四川盆地东北部,二叠纪长兴组时期该区域处于“开江—梁平”陆棚西岸,现今其长兴组礁滩储层段是该气田重要的勘探目的层之一。自 2007 年 yb1c1 井钻遇长兴组顶部优质白云岩储层以来,布置在该礁滩相上的多口探井均获高产工业气流,长兴组礁滩相是有利的油气聚集区这一结论得到验证。

随着元坝地区的勘探进一步的深入,一些问题凸显而来,主要是有的钻井局部储层段产水,进而影响到后续的生产开发问题。所以,如何对长兴组礁滩储层段进行流体识别,圈定出有利的含油气区域,避开储层含水区域,是该区地球物理探索的一项重要任务。

叠前 AVO 反演^[2-10]作为 AVO 应用技术的

一个重要组成部分,是合理地提取隐藏在叠前地震信息中的岩性和流体信息的重要途径之一。它以描述平面波反射和透射的 Zoeppritz 方程为基础,利用叠前地震反射振幅随入射角的变化与地层弹性参数间的关系,采用一定的数学算法,从叠前地震数据中估算岩石的弹性参数(如密度、纵波速度、横波速度、泊松比等),进而利用这些弹性参数进行岩性分析和油气的预测。

1 礁滩储层预测原理及储层流体物性分析

元坝地区长兴组生物礁储层岩石类型主要为溶孔白云岩、白云岩、生屑灰岩等,储集空间类型包括溶孔、溶洞、晶间孔、裂缝及生物体腔溶孔。而长兴组台缘浅滩储层岩石类型主要为白云质灰岩、含云灰岩,储集空间类型主要为孔隙和裂缝。在孔隙度曲线上表现为孔隙度显著增大,与致密地层相比,呈相对高孔隙度特征。

收稿日期:2012-06-08

基金项目:国家科技重大专项“海相碳酸盐岩储层预测与流体识别技术研究”(2008ZX05005)

作者简介:杨鸿飞(1980—),男,工程师,主要从事地震资料解释及储层预测研究工作。E-mail:wygy888@126.com

1.1 礁滩储层预测原理

众所周知,四川盆地的生物礁滩储层都存在含水或含气或气水同层的现象,对其储层类型的流体识别问题一直是地球物理学家探索的目标之一。在本次针对元坝地区礁滩储层的流体识别中,笔者尝试使用叠前 Lambda-Mu-Rho 分析和 AVO 反演技术来研究该区礁滩储层的油气分布及流体识别问题。

叠前 AVO 反演技术所得到的泊松比是预测储层的一个有力手段。泊松比是材料横向应变与纵向应变的比值,也叫横向变形系数,它是反映材料横向变形的弹性常数。其中自然界的岩石泊松比值 σ 一般在 $[0, 0.5]$ 范围内。理论上当岩石越坚硬, σ 越大;岩石越疏松, σ 越小,尤其是压裂破碎和含流体后的岩石,泊松比 σ 值明显减小。在石油物探中,按岩石泊松比的变化,尤其是含不同流体后岩石泊松比值的变化,可以进行岩石的横向追踪,判断岩石的含油、气、水特征。

泊松比参数对地层是否含气比较敏感,地层含气时,纵波速度 (V_P) 会大幅度降低,横波速度 (V_S) 不受影响,而泊松比 (σ) 与纵横波速度比之间有如下关系:

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{2(1-\sigma)}{1-2\sigma}} \quad (1)$$

实际资料分析表明,当岩石的孔隙和裂缝中含水时,纵横波速度比为 $1.4 \sim 2.0$;当岩石的孔隙和裂缝中含气时,纵横波速度比为 $1.3 \sim 1.8$;水饱和非固结地层的纵横波速度比大于 2.0 。因此,可以利用泊松比值推断岩石孔隙中流体的性质和裂缝的发育情况。

Goodway^[11] 认为 λ (λ) 和 μ (μ) 属性的物理解释是: λ 属性即不可压缩性,对孔状流体比较敏感;而 μ 属性即硬度,对岩石基质(矿物成分)比较敏感。因此,对基于参数 λ 和 μ 及密度 ρ 做 AVO 反演提出一种新的方法,称为 Lambda-Mu-Rho 方法^[12]。同时,还提出了用 Lambda-Mu-Rho 分析能够获得岩性和孔隙流体的信息,该方法已经在一些地区得到了良好的应用。

首先,我们对 Zoeppritz 方程进行简化:

$$R = \frac{1}{2} (1 + \tan^2 \theta) \frac{\Delta I_P}{I_P} - 4 \left[\frac{V_S}{V_P} \right]^2 \sin^2 \theta \frac{\Delta I_S}{I_S} \quad (2)$$

式中: $\frac{\Delta I_P}{I_P}$ 为纵波的反射系数;

$\frac{\Delta I_S}{I_S}$ 为横波的反射系数。

反射系数通过下面的公式和 λ 、 μ 建立数学关系:

$$\lambda \rho = I_P^2 - 2 I_S^2 \quad \mu \rho = I_S^2 \quad (3)$$

式中: ρ 为密度。在密度没有确定时,参数不能被直接获得。

1.2 礁滩储层物性分析

利用测井资料对钻遇长兴组礁相白云岩储层的 yb103 井进行了泊松比与孔隙度的交汇分析,并通过孔隙度进行了储层类型划分。对 yb103 井的储层与非储层段进行了分析(图 1),图 1 中黄色为气层;蓝色为水层;紫色为气水同层;灰色为围岩。研究表明,储层段内泊松比相对较低,为 0.28 左右(见图中紫色虚线框内);而非储层段则泊松比相对较高,为 0.31 左右(见图中红色虚线框内),两者差异较为明显。由此可见,利用泊松比值能够对该区礁滩储层进行流体与围岩的区分。

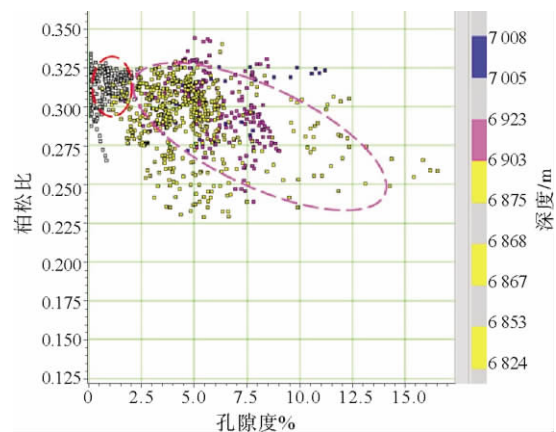


图 1 yb103 井储层段泊松比与孔隙度交会图

Fig. 1 Crossplot of Poisson ratio and Porosity of the reservoir in Well yb103

从该区现有钻井实测资料统计可知, I 类储层(孔隙度 $> 10\%$ 时,泊松比在 $0.25 \sim 0.305$ 之间,平均约 0.28)、II 类储层(孔隙度在 $5\% \sim 10\%$ 时,泊松比在 $0.23 \sim 0.32$ 之间,平均约 0.285)、III 类储层(孔隙度在 $2.5\% \sim 5.0\%$ 时,泊松比在 $0.23 \sim 0.325$ 之间,平均约 0.29)的分布情况,从

优质储层到较差储层的泊松比值呈增加趋势,到非储层时,其泊松比值更高,总体上物性差异相对明显。

利用 $\lambda\rho$ 分析技术来对储层的流体进行识别(图 2)。对于 yb103 井礁滩储层纯含气情况, $\lambda\rho$ 值主要集中分布在 $60\sim 120\text{ GPa}\cdot\text{g/cc}$ 之间,该储层段孔隙度在 2.5% 以上;储层纯含水情况的 $\lambda\rho$ 值分布在 $110\sim 128\text{ GPa}\cdot\text{g/cc}$ 之间,孔隙度在 $3.0\%\sim 11.2\%$ 之间;储层存在气水同层情况的 $\lambda\rho$ 值在 $60\sim 130\text{ GPa}\cdot\text{g/cc}$ 之间,孔隙度在 $3.0\%\sim 11.2\%$ 之间。结果显示,利用孔隙度预测技术不能有效地区分储层的流体分布情况,而 $\lambda\rho$ 技术可以有效地对流体进行准确的预测。本区大量研究资料表明,储层纯含气时其 $\lambda\rho$ 值最小,主要分布在 $50\sim 120\text{ GPa}\cdot\text{g/cc}$ 之间,而围岩及水层的 $\lambda\rho$ 值最大,范围则主要分布在 $115\sim 140\text{ GPa}\cdot\text{g/cc}$ 之间,而气水同层 $\lambda\rho$ 值则分布在纯气及纯水之间。

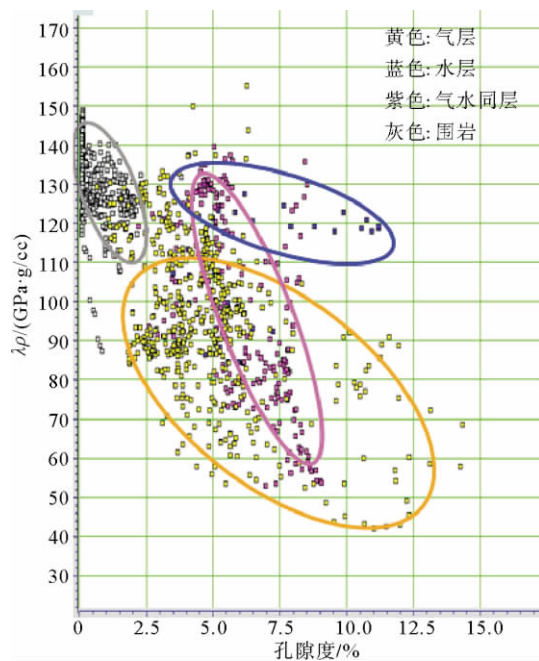


图 2 yb103 井礁滩储层段 $\lambda\rho$ 与孔隙度交会图

Fig. 2 Crossplot of $\lambda\rho$ and porosity of the reservoir in Well yb103

2 AVO 反演及效果分析

AVO 反演这一具体过程有不同的表现形式。就反演过程采用的数学手段来看,主要分为迭代正

演模拟、线性反演和非线性反演;就反演所用的资料而言可分为单波 AVO 反演和多波 AVO 反演;就反演的目标而言,可以细分为 AVO 属性反演、弹性参数反演、叠前地震属性反演等。其中,AVO 属性反演包括根据 Zoeppritz 方程的近似表达式估算的与角度无关的参数反演,如截距属性、梯度属性等,也包括岩性差异参数反演。

岩性差异参数反演是直接利用反射系数近似公式获取的岩性变化差异参数,如纵波速度反射率、泊松比反射率、密度反射率等,这些参数主要用于定性的岩性和油气预测;弹性参数反演则要求从地震信息中提取纵波速度、密度、泊松比、横波阻抗等参数,这些参数的获得为地震解释提供了丰富的信息,可以用这些参数进行定性和定量的解释,极大地丰富了地震岩性分析工作;叠前地震属性反演主要是指从叠前地震数据中提取出有关地震波运动学、动力学特征的参数,如瞬时相位、瞬时频率等,这些参数对于油气储层的描述与预测也具有重要的意义。

本次研究分别利用 AVO 叠前反演所得到的泊松比及 $\lambda\rho$ 成果实现对元坝地区礁滩储层的预测,现分别描述如下:

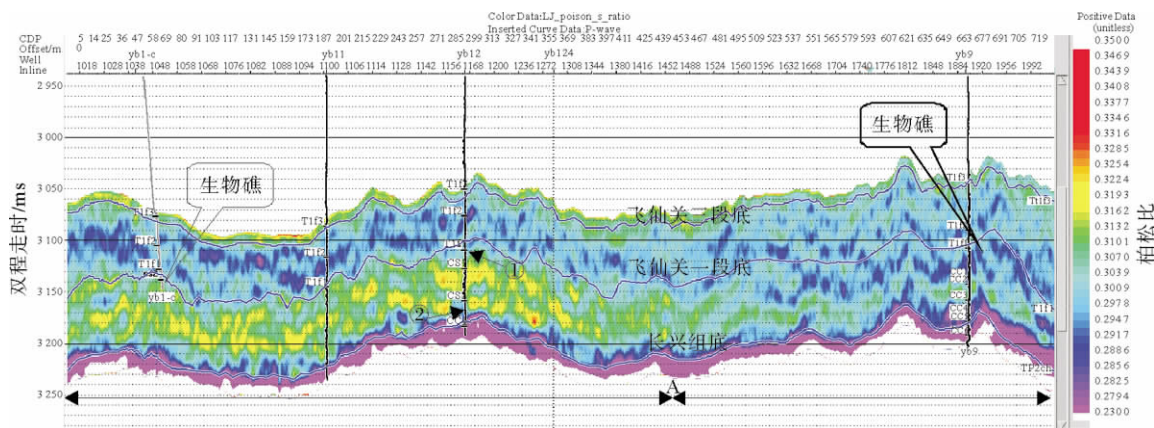
2.1 泊松比分析

前面已经提到过,泊松比值 σ 在 $0\sim 0.5$ 范围内(理想不可压缩的材料泊松比值等于 0.5),泊松比大致反映了岩石的特征。按岩石泊松比的变化,尤其是含不同流体后岩石的变化,可以进行岩石的横向追踪,判断岩石的含油、气、水特征。在区域环境相同的岩石特征背景下,泊松比异常的地方很可能就是流体变化的地方。根据前面岩样分析结果,白云岩中饱气的情况下泊松比值在 0.3 左右,饱水情况下泊松比值在 0.28 左右。在实际反演中,yb9 井储层段相对于 yb1-c、yb11、yb12 井的泊松比较低,约在 0.289 ,而含气井(yb1-c、yb11、yb12 井)储层段的泊松比值约在 0.309 。

图 3 为过 yb1-c、yb11、yb12、yb9 井的泊松比 σ 联井剖面(图 3),各井都处在该区长兴组礁滩相带内,钻井资料显示,yb11、yb12 井钻遇滩相,而 yb1-c 和 yb9 井钻遇礁相。从图 3 上可看到,在 A 点两边,泊松比剖面出现明显差异。整体上左高

右低,左边从色带上以黄、淡蓝色为主体,右边则以淡蓝、蓝色为主体。所以,推测两边的岩石物理性质有较大的改变。从各井的储层段来分析,已知含气储层段色带上基本上为淡蓝色,泊松比值实测为 0.3 左右,这与岩石物理特征分析相同,而储层底部(非储层)为 0.32 左右(黄色),这也表明该区礁核相当致密,同时说明了岩性在垂向上出现了差异,通常为岩体溶孔中充填气体所至,使其泊松比值降低。反演结果也表明,当研究区内的生物礁滩储层含气时,该储层段的围岩泊松比值均增大,而含水的生物礁滩储层的围岩泊松比值则相对降低,2 种不同储层类型的围岩泊松比值差异也较为明显。实例揭示,yb9 井储层段色带

也基本上为淡蓝色,储层段泊松比值比含气储层低,但其储层底部(非储层)为 0.28 左右(蓝色),与其上部三叠系飞仙关一段页岩段的泊松比基本相同,也即在该区域上三叠系长兴组与三叠系飞仙关组的岩石物理性质没明显改变,这个特征与 A 点左边是截然不同的。钻井揭示,yb9 井钻遇水层,经大量的化学成分分析,该水呈酸性。酸性水对礁滩相的岩层酸化腐蚀比天然气对岩层的腐蚀要强得多,故其对后期孔洞等改造比含气的大,这也使得本来岩性相同的岩石物理性质出现较大的变化,使其泊松比值明显偏低。从水到气的过渡段也呈现出了泊松比横向上整体的强弱变化。



井柱分层: T1f3 为飞三段底; T1f2 为飞二段底; T1f1 为飞一段底; Cs1~3 分别为储层 1~3; cc1~6 分别为储层 1~6

图 3 过 yb1-c、yb11、yb12、yb9 井泊松比 σ 联井剖面

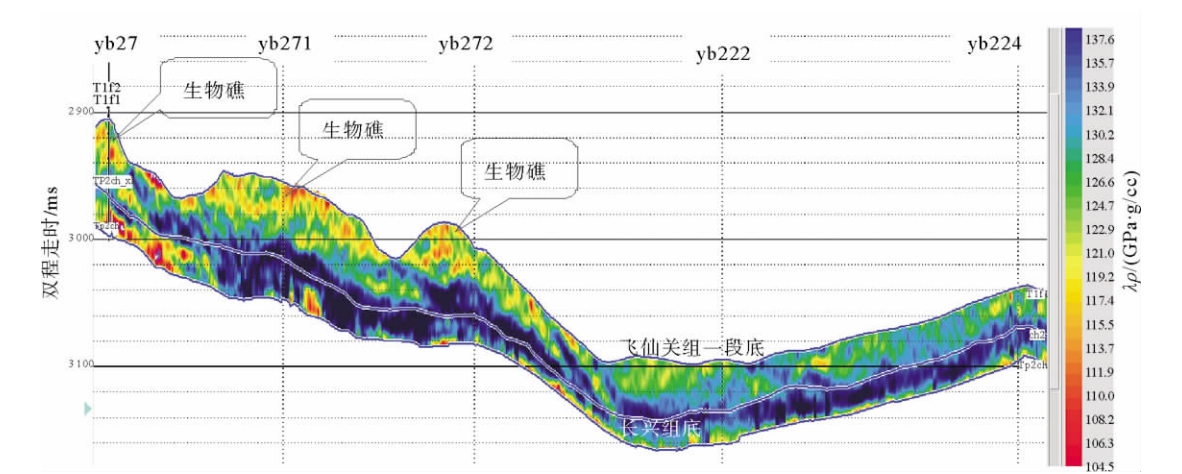
Fig. 3 Poisson ratio of crosswell section of yb1-c, yb11, yb12, yb9

2.2 $\lambda\rho$ 分析

前述已提到了利用 $\lambda\rho$ 分析技术来实现流体的识别问题,本次利用该技术较好地实现了对礁滩储层的预测及识别(图 4)。图中可见, yb271、yb27、yb272 均位于构造的较高部位,而 yb222 及 yb224 位于构造低部位。从剖面上可以看到,生物礁顶上储层的 $\lambda\rho$ 值基本上为黄—红色(小值),而低部位的 $\lambda\rho$ 为高值,呈蓝—绿色。笔者认为当储层 $\lambda\rho$ 为低值时(黄—红色区域)为有利含气储层,而蓝色及绿色层段为含水或非储层,这也与天然气和水在运移过程中两者产生分离有关——气一般往高部位充注,致使水在低部位聚集。

3 应用效果分析

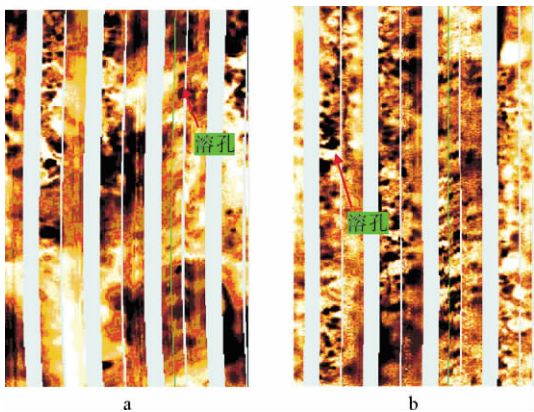
应用上述 2 种预测技术方法显示反演结果具有趋同性,都取得了较好的地质效果。在 A 点左边的现有钻井均获得了工业气流,而 A 点右边的 yb9 井则钻遇水层。yb12 井的储层段 FMI 图像显示(图 5)溶孔、洞发育(黑色影像),且连通性良好。通过对该区长兴组礁滩储层岩心样品的观察,长兴组储层发育大的溶孔、溶洞不仅溶蚀性好,而且溶孔、溶洞之间连通性较好,展示了该地区良好的天然气勘探前景。yb12 井在长兴组储层段酸化后获得了 $53.14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的产能, yb11 井酸化后也获得了 $51 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的产能,而 yb1-c 井则日产气近 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。



井柱分层: T1f2 为飞二段底; T1f1 为飞一段底; Tp2ch_xh 为长二段底; Tp2ch 为长兴组底

图 4 过 yb27、yb271、yb272、yb222、yb224 井的 λρ 联井剖面

Fig. 4 λρ of crosswell section of yb27、yb271、yb272、yb222、yb224



a 图 3 中①部位; b 图 3 中②部位

图 5 yb12 井长兴组储层段 FMI 图像

Fig. 5 FMI image of reservoirs of Changxing Formation in Well yb12

在图 4 中, yb27 井经测试获得 $120 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流, yb271 井经测试也获得 $124 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流, 反演结果显示 yb272 也同样会稳获工业气流, 这与该井的测井资料解释相吻合, 而 yb222 井及 yb224 井经测井资料分析显示为气水同层, 储层类型为 II、III 类(表 1), 也与反演结果相吻合——所对应的 $\lambda\rho$ 值范围基本上位于 105~122 之间。实践显示这 2 项技术在四川海相礁滩相储层预测中具有广阔前景, 可以加以推广应用。

表 1 礁滩储层类型分类标准(据文献[13])

Table 1 Classification of carbonate reefshoal reservoir rocks (from reference[13])

类型	孔隙度 /%	渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	排驱压力 /MPa	水饱和度 /%	评价
I	>10	>10	<0.08	<10	极好储层
II	6~10	1~10	0.08~0.35	10~15	好—中等储层
III	4~6	0.1~1.0	0.35~1.30	15~20	储层
IV	2~4	0.01~0.1	1.30~8.0	20~20	差储层
V	<2	<0.01	>8.0	>25	非储层

4 结论

通过对元坝地区长兴组礁滩储层流体识别进行研究得到了以下结论:

- (1) 该区礁滩储层含气或含水都会造成泊松比值的下降, 与非储层段泊松比高值有较为明显的差异, 其中, 纯含气的储层比气水同层的泊松比值都低。
 - (2) 利用叠前 AVO 反演所得的 $\lambda\rho$ 可以有效地对储层的流体类型进行相应的分析。纯含气的储层具有 $\lambda\rho$ 值低的特点, 而非含气储层具有高 $\lambda\rho$ 值。
 - (3) 天然气具有向高部位运移的特点, 而低部位储层往往被水所充填。
- AVO 反演技术是一项具有发展潜力的技术,

它不仅可用于烃类检测,也可用于储层精细描述,随着技术的进步,该技术将得到越来越广泛的应用。

参考文献:

- [1] 胡伟光,蒲勇,赵卓男,等.川东北元坝地区长兴组生物礁的识别[J].石油物探,2010,49(1):46-53.
- [2] Ostrander W J. Plane-wave reflection coefficients for gas sands at non-normal angles of incidence[J]. Geophysics, 1984,49(10):1 637-1 648.
- [3] 吴光大,徐尚成. AVO 技术在柴达木盆地东部天然气检测中的应用[J].石油地球物理勘探,1994,29(增刊 1):24-31.
- [4] 史松群,赵玉华.苏里格气田 AVO 技术的研究与应用[J].天然气工业,2002,22(6):30-34.
- [5] 朱兆林,赵爱国.裂缝介质的纵波方位 AVO 反演研究[J].石油物探,2005,44(5):499-503.
- [6] 胡伟光,易小林,肖伟,等.川东北双庙场构造嘉二段储层综合预测[J].地球物理学进展,2010,25(5):1 723-1 736.
- [7] 胡伟光,李发贵,杨鸿飞.叠前弹性波阻抗反演在四川 FL 地区礁滩型储层预测中的应用[J].海相油气地质,2010,15(4):62-67.
- [8] 易小林,潘雪梅,胡伟光. PG 地区飞仙关组储层综合预测研究[J].中国西部科技,2010,9(8):12-13.
- [9] 潘仁芳. AVO 的内涵与外延[J].石油天然气学报,2006,28(2):50-55.
- [10] 王振国,陈小宏,王学军,等. AVO 方法检测油气应用实例分析[J].石油地球物理勘探,2007,42(2):194-197.
- [11] Chopra S, Pruden D. Multiattribute seismic analysis on AVO-derived parameters a case study[J]. The Leading Edge,2003,22(10):998.
- [12] Aeissa M, Castagna J P. Case study: AVO analysis in a high-impedance Atoka Sandstone (Pennsylvanian), North Arkoma Basin, McIntosh County, Oklahoma[J]. The Leading Edge,2003,22(10):988.
- [13] 寇雪玲.四川盆地普光气田三叠系飞仙关组储层特征[J].天然气勘探与开发,2011,34(4):9-12.

APPLICATION OF PRE-STACKING AVO INVERSION IN YUANBA AREA, NORTHEASTERN SICHUAN

YANG Hongfei, HU Weiguang, LIN Lin, LI Wencheng

(Southern Branch of SINOPEC Exploration Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: The oil-gas-water system is rather complicated in the reef bank reservoir of the Changxing Formation of Permian in the Yuanba region of northeastern Sichuan. It is quite often to encounter water reservoirs or gas-water mixed reservoirs in drilling. It is highly required to develop a technique to effectively distinguish gas reservoirs from non-reservoirs. Based on the physical properties of different types of fluid, we studied the geophysical responding characteristics of gas reservoir, gas-water reservoir, water reservoir and non-reservoir respectively. It is found that the Poisson ratio and $\lambda\rho$ in gas and gas-water mixed reservoirs are simply lower than those in non-reservoirs. Using the AVO inversion technique for inversion processing, we obtained the Poisson ratio and $\lambda\rho$ of the reef bank deposits. And then the Poisson ratio and $\lambda\rho$ were used to predict the distribution of gas in the Reef bank reservoir of the Changxing Formation in the region. The results of prediction fit well with the drilling data. Therefore, the AVO pre-stacking inversion technique could be promoted to similar marine reef bank reservoirs.

Key words: reef reservoir; AVO inversion; reservoir recognition; Changxing Formation; northeastern Sichuan